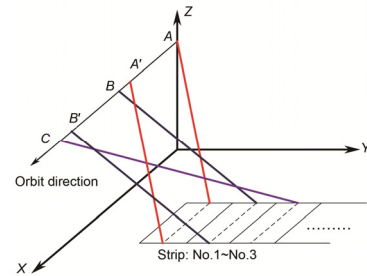




# 敏捷卫星同轨多条带成像拼接重叠像元数阈值分析

许越, 冯华君\*, 徐之海, 李奇, 陈跃庭

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027



**摘要:** 针对敏捷成像中的多条带拼接成像模型, 对条带图像的拼接重叠度进行仿真分析。建立多条带拼接成像的任务模型和几何退化模型, 提出重叠区域宽度阈值的判别准则。针对星下点条带, 分析不同场景类型遥感图像的重叠区域宽度阈值, 探究了地面分辨率变化对重叠区域宽度阈值的影响。针对敏捷条带, 分析了俯仰、横滚等敏捷特性对于重叠阈值的影响。仿真结果表明, 在 0.46 m 地面分辨率下, 6 类场景类型重叠宽度阈值均在 28 pixels 以上, 其中军港机场、海岛阈值较大, 超过 31 pixels。阈值统计符合正态分布的  $3\sigma$  原则, 证明了阈值求解方式的可信度。星下点成像时地面分辨率变化对像面重叠像素阈值无太大影响, 但对地面实际重叠宽度阈值影响较大。而敏捷条带成像时, 卫星的俯仰和横滚将会增大条带的重叠宽度阈值, 几何变形对阈值的影响超过星下点时地面分辨率的变化。通过对条带拼接重叠度的仿真分析, 为敏捷卫星的高分辨率光学成像任务规划提供了有意义的参考。

**关键词:** 敏捷卫星; 多条带拼接; 敏捷成像; 重叠区域宽度阈值; 场景类型; 地面分辨率; 卫星姿态

中图分类号: V474.2; TP391.41

文献标志码: A

## Analysis on stitching overlap pixel threshold of one-orbit multi-strip agile remote sensing imaging

Yue Xu, Huajun Feng\*, Zhihai Xu, Qi Li and Yueting Chen

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** This paper shows some simulation analysis on stitching overlap threshold of strip images for multi-strip stitching model in agile remote sensing imaging. The mission model and geometric degradation model are proposed for multi-strip stitching imaging, and the criterion of overlap region width threshold is presented. Against the nadir strip, we analyze the overlap threshold of different scene types and explore the threshold variation affected by the changes of ground sample distance (GSD). For the agile strip, the effect of pitch angle and roll angle on overlap threshold is analyzed. The simulation result shows that, at 0.46-meter GSD value, the overlap threshold is more than 28 pixels for 6 scene types, and it is even beyond 31 pixels for the airport and island. The statistical characteristics of threshold perfectly match the  $3\sigma$  guidelines in normal distribution, which has proved the reliability of the solution of overlap threshold. In nadir imaging, GSD has little effect on the overlap pixel threshold at image plane, but has a great effect on overlap distance threshold at ground plane. In agile strip, with larger pitch angle and roll angle, the overlap threshold will increase significantly, which means that the geometric degradation is more powerful to the threshold than the GSD variation. By analyzing the stitching overlap threshold of the strips, we give a meaningful suggestion to the mission planning of high resolution remote sensing imaging by agile satellite.

**Keywords:** agile satellite; multi-strip stitching; agile imaging; overlap region width threshold; scene type; ground sample distance; satellite attitude

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.005

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(11): 1066–1074

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-10-14

\*E-mail: fenghj@zju.edu.cn

## 1 引言

在高分辨率光学遥感成像领域,由于受到卫星平台、运载能力、器件工艺水平的限制,成像时难以直接同时获得高分辨与宽视场。近年来发展迅速的高分辨率敏捷卫星,能够利用较强的姿态机动能力快速改变卫星指向,对地面目标进行灵活观测<sup>[1]</sup>。截至目前,典型的敏捷卫星<sup>[2-5]</sup>包括美国的 QuickBird-2、WorldView 系列<sup>[6]</sup>,法国的 Pleiades<sup>[7]</sup>等。敏捷卫星具备同轨多条带拼接成像、同轨多热点定制成像、同轨多视角立体成像等多种模式,能在一定程度上同时获取高分辨和宽视场。

近年来,国内外在高分辨率光学遥感成像方面发展迅速。程宇峰等<sup>[8]</sup>针对多相机成像系统提出了一种基于虚拟大相机的高精度影像拼接方法。余婧等<sup>[9]</sup>对同轨多条带成像地面目标的区域划分、观测序列确定等方面进行了深入研究。Wang 等<sup>[10]</sup>针对敏捷卫星无缝拼接成像提出了一种姿态调整算法。Sun 等<sup>[11]</sup>利用 Kuaizhou-1 敏捷卫星的图像数据提出了一种针对侧摆像移模糊的校正方法。Barazzetti 等<sup>[12]</sup>利用 WorldView-3 成像数据对几何定位精度进行了分析。

对于同轨多条带拼接成像模式而言,TDI(time delay integration)相机在短时间内获取多幅包含一定重叠区域的高分辨率窄视场遥感图像,配准拼接成一幅高分辨率宽视场遥感图像。在任务规划中,考虑最终成像的质量,相邻条带的重叠区域宽度选择将直接影响成像的效果。首先,重叠区域宽度要达到一定量,保证相邻条带能够高精度地配准拼接;其次,重叠区域宽度不能太大,否则会造成卫星成像时间分辨率的降低。因此,需要针对不同成像条件寻找合适的阈值,保证同时获得高空间分辨率和高时间分辨率。

本文提出了重叠区域宽度阈值判断准则,针对星下点条带图像分析了不同场景类型遥感图像的重叠区域宽度阈值和不同地面分辨率下的重叠阈值变化情况,并结合多条带拼接敏捷成像的几何退化模型,仿真分析了敏捷特性对于重叠阈值的影响。

## 2 理论模型

### 2.1 同轨多条带拼接敏捷成像模型

同轨多条带拼接敏捷成像模式中,卫星具备灵活机动的姿态调整能力,可以在短时间内实现同一轨道多次同向推扫,从而拼接成像,同时获得高分辨和宽

视场。TDI 遥感相机随着姿态的调整进行不同对地指向的定姿推扫,当卫星完成一个条带的推扫后,立即进行俯仰方向的反向机动,同时微调横滚角,将垂直轨道方向的指向平移一个幅宽的距离,使下一条带的推扫起始位置与前一条带的起始位置相邻。该模式工作示意图如图 1 所示。地面上划分了多个相邻条带,沿轨道飞行方向的初始位置一致,AA'、BB' 为定姿推扫成像的阶段,AB'、B'C 为卫星姿态调整的阶段。卫星需在姿态调整阶段准确地调整至下一推扫姿态。

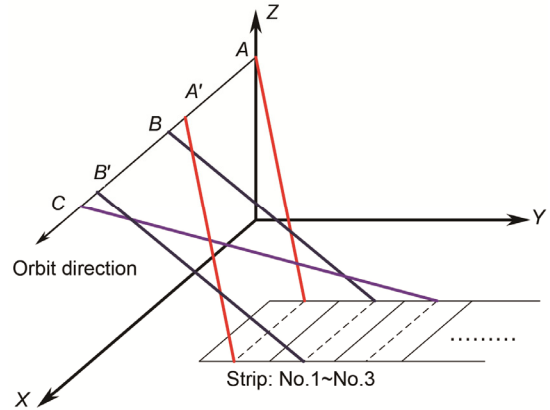


图 1 同轨多条带拼接成像模型。

Fig. 1 Imaging model of one-orbit multi-strip stitching.

在非星下点推扫的情况下,获取的遥感图像会发生几何变形,在进行相邻条带配准之前通常会先进行几何校正,将其统一到星下点分辨率,再进行拼接。因此需要考虑每一条带定姿推扫过程中,由卫星姿态指向引起的几何变形。某一指向条件的卫星姿态示意图如图 2 所示。

轨道高度为  $H$ , 相机焦距为  $f$ , 像元尺寸为  $p$ , 由

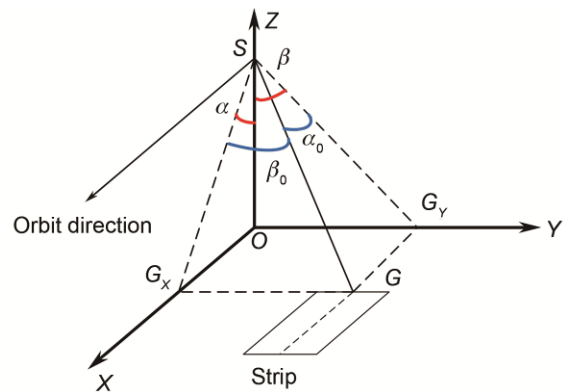


图 2 卫星姿态示意图。

Fig. 2 Attitude of agile satellite imaging model of one-orbit multi-strip stitching.

图2通过几何关系求得条带中心线上的地面分辨率退化公式为

$$\begin{cases} D_X = \frac{pH}{f} \frac{1}{\cos \alpha \cos^2 \beta_0} = \frac{D_{\text{nadir}}}{\cos \alpha \cos^2 \beta_0} \\ D_Y = \frac{pH}{f} \frac{1}{\cos^2 \alpha_0 \cos \beta} = \frac{D_{\text{nadir}}}{\cos^2 \alpha_0 \cos \beta} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： $D_X$ 为线阵方向地面分辨率， $D_Y$ 为推扫方向地面分辨率， $D_{\text{nadir}}$ 为星下点地面分辨率。 $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为由卫星指向和轨道坐标系所确定的等效俯仰角和等效横滚角， $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 为不同转序下的实际姿态转角，由几何关系可以获得：

$$\begin{cases} \alpha_0 = \arctan(\tan \alpha \cos \beta) \\ \beta_0 = \arctan(\cos \alpha \tan \beta) \end{cases}. \quad (2)$$

考虑地球曲率，条带的幅宽变化如图3所示。

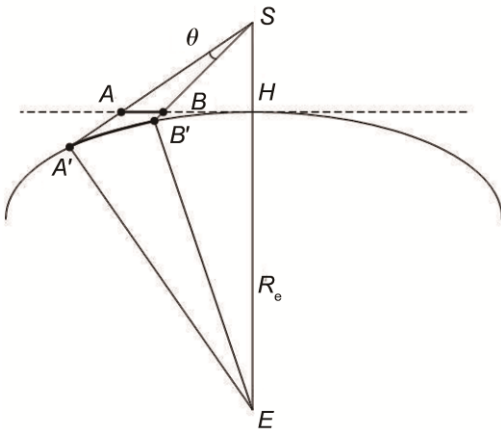


图3 地球曲率引起幅宽变化示意图。

Fig. 3 Variety of strip width caused by earth curvature.

球面弧长  $A'B'$  对应实际成像幅宽，线段  $AB$  为上述推导的理想幅宽。由于幅宽是地面分辨率的宏观表征，因此可以通过幅宽对线阵方向地面分辨率进行

修正。

$$D_{X \text{ fix}} = \lambda \cdot D_X. \quad (3)$$

利用球面三角知识和共线方程坐标求解方法，针对不同等效俯仰角  $\alpha$ 、等效横滚角  $\beta$ ，对实际幅宽进行数值求解，获得修正系数  $\lambda$  的查找表，对线阵方向分辨率进行修正。部分采样点的修正系数如表1所示。

表1 线阵方向分辨率修正系数(部分采样点)。

Table 1 Fix coefficient of  $D_X$  (part of the sampling point).

Equivalent pitch angle/(°)	Equivalent roll angle/(°)			
	0	15	30	45
0	1.0000	1.0026	1.0123	1.0390
15	1.0080	1.0107	1.0209	1.0487
30	1.0386	1.0417	1.0534	1.0859
45	1.1268	1.1312	1.1479	1.1957

根据 TDI 相机推扫成像的特性，沿推扫方向分辨率均匀退化，沿线阵方向分辨率随指向角的细微差异会有微小变化。因此，本文针对几何变形的条带图像，计算地面坐标系至相机坐标系的坐标变换关系，逐行逐点进行坐标映射，然后通过三次样条插值的方法获得校正图像，校正流程如图4所示。

条带图像逐行提取获得线阵图像，根据当前条带卫星姿态参数和轨道参数把线阵图像坐标向量  $X_1$  由卫星本体坐标系映射至地面坐标系，然后根据光学成像特性利用共线方程求解对应地面的实际坐标向量  $X_G$ 。要将其校正星下点分辨率，由  $X_1$  经共线方程可直接得到对应星下点的向量坐标  $X_G'$ 。由实际坐标向量  $X_G$  与对应的图像像素值向量  $I_G$ ，目标坐标向量  $X_G'$ ，通过三次样条插值可以求得线阵校正图像  $I_G'$ 。再根据推扫方向分辨率均匀退化的特性，通过逐列线性插值获取条带校正图像。

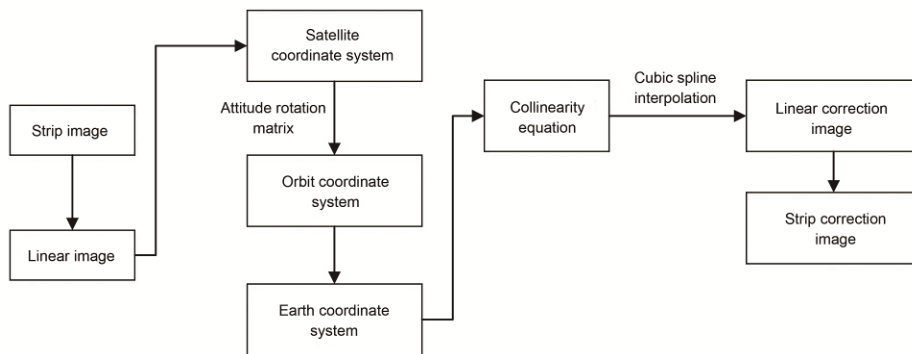


图4 几何变形条带图像校正流程图。

Fig. 4 Flowchart of image correction of geometric deformation.

通常 TDI 线阵宽度会达到数千甚至数万像素,但是重叠宽度较少,如图 5 所示。仿真的图像进行几何映射时只是作为整个线阵宽度的一小部分进行映射,因此仿真图像的坐标向量参考原点并非截取图像中心线,而是条带中心线。仿真中所用的实际条带图像也是通过上述过程的逆过程,由星下点图像进行几何变形获取。

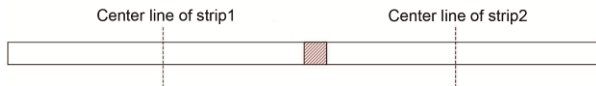


图 5 条带中心线与重叠区域。

Fig. 5 Center lines and overlap region of adjacent strips.

## 2.2 重叠区域宽度阈值判别准则

遥感图像纹理信息丰富,局部特征非常多<sup>[13]</sup>。对于无地面标记点的一般情况,通常通过寻找特征点进行图像配准。本文使用 SIFT(scale invariant feature transform)算子进行特征点检测和配准。SIFT<sup>[14]</sup>特征算子,由 Lowe 提出并完善,是一种在高斯差分尺度空间内寻找极值点的方法,对平移、旋转、尺度缩放、亮度变化均能保持不变性,在视角变化、仿射变换和噪声的干扰下也具有较好的稳定性。配准过程中,使用 RANSAC(random sample consensus)<sup>[15]</sup>方法来剔除误匹配的特征点组并优选 4 组匹配的特征点组求解单应性矩阵  $H$ ,并以所有特征点的匹配残差 RMSE(root mean square error)作为衡量配准质量的客观指标。RMSE 定义为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x'_i - X_i)^2 + (y'_i - Y_i)^2]} \leq \varepsilon, \quad (4)$$

式中:  $(x'_i, y'_i)$  为配准图特征点经单应性矩阵转换后的坐标,  $(X_i, Y_i)$  为参考图内对应匹配的特征点坐标,  $\varepsilon$  为设置阈值,通常设为 1,即亚像素精度。

对于相邻图像条带,当重叠区域太窄时,特征点数量少,配准精度不足;当重叠区域太宽时,卫星成像的效率又会降低。因此,应根据不同的场合选取合适的重叠宽度,在保证拼接质量的同时又能有较高的成像效率。

以一张 GeoEye-1 分辨率 0.46 m 都市场景的遥感图像为例,取其中具有少量重叠区域的两个子块进行配准拼接。在特定重叠宽度下,配准效果如图 6 所示。

在重叠宽度小于 26 pixels 时,由于特征点较少且精度不足,拼接效果很差;当重叠宽度超过 26 pixels 时,拼接效果趋于稳定,特征点平均匹配残差小于 1 pixel。

如图 7 所示,实际 TDI 线阵宽度(条带宽度)通常达数万像素,而用于配准的有效区域只有两条带的重叠区域  $A-B-C-D$ ,因此用于重叠阈值仿真评估只需要取相邻条带的边缘一部分像素,即  $L_T-L_B-C-D$ 、 $A-B-R_T-R_B$ 。当重叠区域宽度较小时,特征点数量极少,因为特征点本身寻找也会存在错误,会出现尽管特征点平均匹配残差极小,但完全是误匹配的情况。因此本文将重叠区域 4 个顶点作为标记点,由单应性矩阵的特点,通常边缘的点具有更大的特征点 RMSE。在下文仿真中,提出了如下约束条件:

$$\begin{cases} E_{\text{RMS Feature}} \leq 1 \\ E_{\text{RMS } A,B,C,D} \leq 1 \\ E_{\text{RMS Overlap}} \leq 1 \\ E_{\text{RMS Th}} \leq 1 \text{ and } E_{\text{RMS Th}+1} \leq 1 \text{ and } E_{\text{RMS Th}+2} \leq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $E_{\text{RMS Feature}}$  为有效特征点平均匹配残差,  $E_{\text{RMS } A,B,C,D}$  为 4 个顶点的平均匹配残差,  $E_{\text{RMS Overlap}}$  为重叠区域内所有点平均匹配残差;  $E_{\text{RMS Th}}$  为阈值时的 RMSE,仿真步长为 1 pixel,连续 3 个宽度满足亚像素配准精度时设置为阈值。

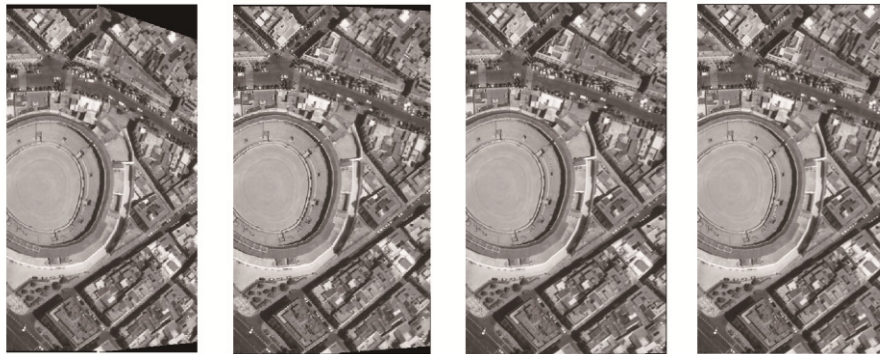


图 6 拼接效果。(a) 21 像素。(b) 26 像素。(c) 30 像素。(d) 40 像素。

Fig. 6 Stitching result. (a) 21 pixels. (b) 26 pixels. (c) 30 pixels. (d) 40 pixels.

重叠区域宽度的阈值影响因素包括：图像尺寸、图像场景类型、图像分辨率、敏捷成像特性。下文将从以上几个方面进行仿真实验。

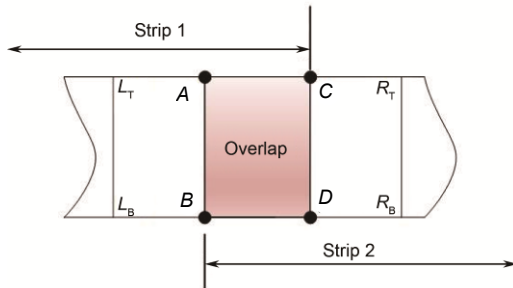


图7 重叠区域示意图.  
Fig. 7 Overlap region.

### 3 实验结果分析

仿真实验图库内共选取了 GeoEye-1、WorldView-2 两颗卫星 51 幅遥感图像，卫星星下点地面分辨率均为 0.46 m。由于遥感图像尺寸较大，对其分割并挑选出不含任何重叠区域的 218 幅子图像作为仿真样本。按照人眼视觉的主观判断，将其分为军港机场(20 幅)、冰川沙漠(17 幅)、大型都市(51 幅)、海岛(54 幅)、乡村田野(66 幅)、山林(10 幅)6 类图像。各类样本示例如

图 8 所示。

#### 3.1 仿真图像尺寸选择

##### 3.1.1 宽度

推扫条带宽度与 TDI CCD 线阵宽度、卫星和光学系统参数直接相关。设定太阳同步轨道卫星轨道高度 460 km，相机焦距 10 m，像元尺寸 10 μm，有效视场角 1.2°，对应线阵宽度约 20000 pixels，对应地面宽度约 10 km。对于同轨多条带拼接模式，对获取的相邻条带图像，寻找特征点进行匹配，实际有效的区域仅为两条带图像的重叠区域。阈值大约在几十像素，因此本文仿真时取 400 pixels 宽度作为条带边缘图像。

##### 3.1.2 长度

TDI 相机单条带推扫长度通常达到几十千米，根据上述卫星参数，以星下点地面分辨率计算条带长度约为几万像素。本文假设超过一定的长度即可满足后续仿真要求，选取了图库内四类场景：城市、乡村、海岛、军港机场，共 20 幅图像，改变图像长度，观察重叠宽度阈值变化情况，其中 4 幅图像结果如图 9 所示。

实验表明，无论对于哪一类场景图像，当重叠区域长度超过 1500 pixels，重叠宽度阈值即趋于稳定，

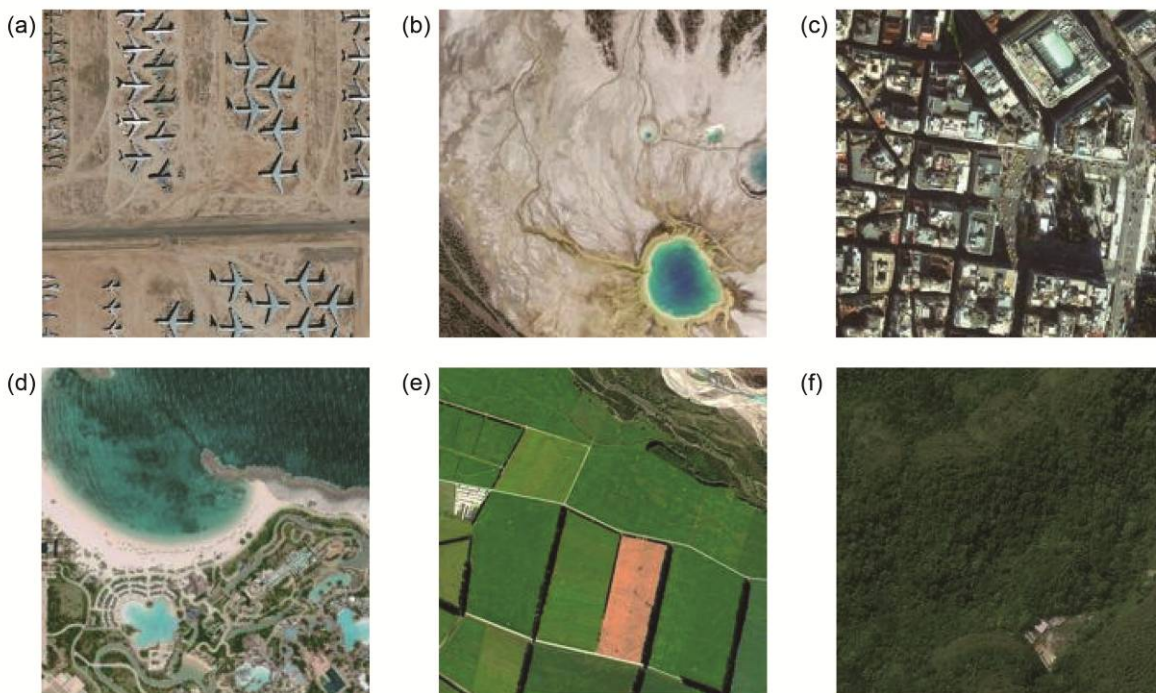


图 8 6 类仿真场景样本示例。(a) 机场和海港。(b) 冰川和沙漠。(c) 城市。(d) 岛屿。(e) 村庄。(f) 森林。  
Fig. 8 Examples of 6 types of simulation source images. (a) Airport and naval port. (b) Glacier and desert. (c) City. (d) Island. (e) Village. (f) Forest.

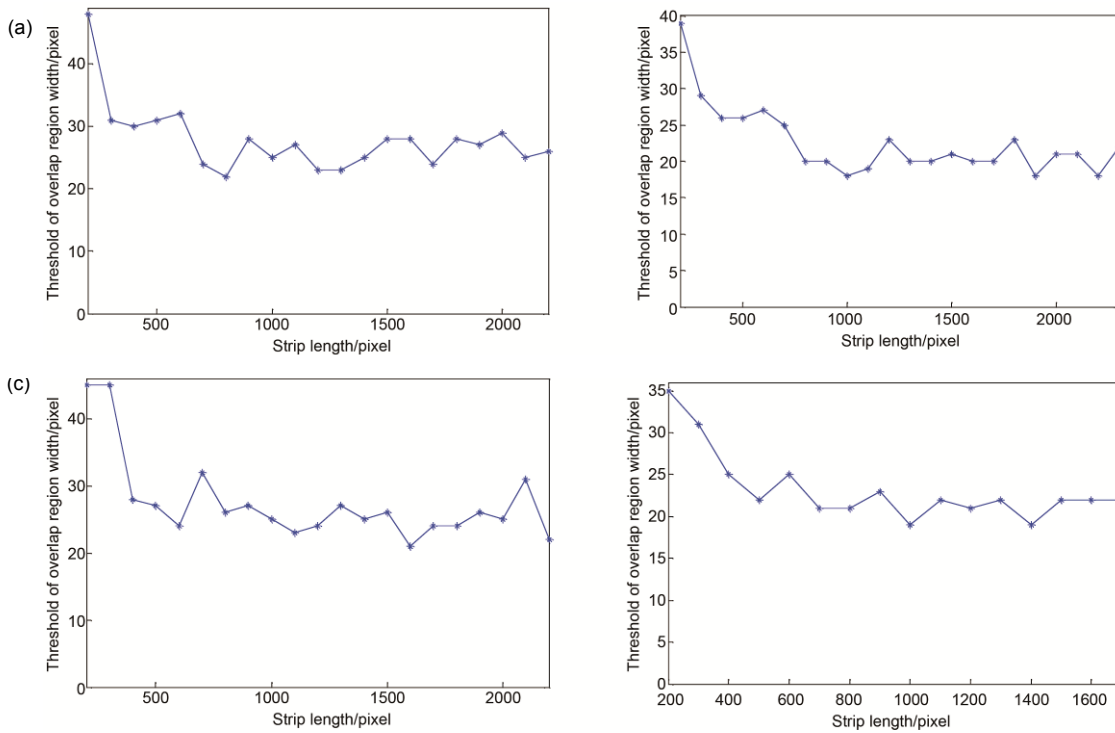


图 9 4 种场景条带长度仿真. (a) 机场. (b) 城市. (c) 岛屿. (d) 村庄.  
 Fig. 9 Strip length simulation of 4 scene types. (a) Airport. (b) City. (c) Island. (d) Village.

因此仿真时只需取条带长度为 1500 pixels，即可研究拼接重叠度的相关特性。

### 3.2 星下点重叠区域宽度阈值

遥感图像包含了丰富的信息，通常可以按照地物的明显差异分为军港机场、冰川沙漠、大型都市、海岛、乡村田野、山林等场景。取图库内所有图像，以星下点作为卫星成像视角，从每幅图中取具有重叠区域的两个 400 pixels×1500 pixels 条带边缘，研究重叠区域宽度阈值统计特性，如表 2 所示。

为验证上述统计的可信度，将各类场景单个样本的重叠阈值宽度阈值进行区间概率统计，与正态分布的  $3\sigma$  准则进行比较，结果如表 3 所示。

表 2 6 种场景类型重叠区域宽度均值与标准差。

Table 2 Mean and standard deviation of overlap width threshold of 6 scene types.

Scene type	Airport	Desert	City	Island	Village	Forest
Mean of threshold /pixels	28.95	25.35	25.80	26.57	25.64	23.20
Standard deviation /pixels	4.30	2.98	2.96	5.39	3.05	3.99

表 3 重叠阈值  $3\sigma$  验证。

Table 3  $3\sigma$  verification of overlap width threshold.

Scene type	Airport	Desert	City	Island	Village	Forest	Normal distribution
$(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ /Probability	0.7000	0.6471	0.6863	0.6852	0.6970	0.6000	0.6827
$(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ /Probability	0.9500	0.9412	0.9804	0.9630	0.9545	1.0000	0.9544
$(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ /Probability	1.0000	1.0000	0.9804	1.0000	1.0000	1.0000	0.9974
Number of images	20	17	51	54	66	10	

表3中,  $\mu$  为平均宽度阈值,  $\sigma$  为标准差。由上可知, 各类场景重叠区域宽度阈值的统计特性与正态分布的  $3\sigma$  准则吻合得非常准确, 自然图像的随机误差在重叠宽度阈值上得到体现, 证明了该统计的可信度。因此, 若将  $\mu+3\sigma$  作为该类场景的统计重叠宽度阈值, 有效性达到 99.74%, 如表4所示。

表4 6种场景统计重叠宽度阈值。

Table 4 Statistical overlap width threshold of 6 scene types.

Scene type	Airport	Desert	City	Island	Village	Forest
Statically threshold /pixels	33.25	28.33	28.76	31.96	28.68	27.19

从统计重叠宽度阈值分析, 军港机场、海岛最大, 其余非常接近。结合图像内容, 军港机场由于人为清理了大量地面信息, 阈值最大, 符合实际情况。而如冰川沙漠、山林这样的地物类型, 尽管从人眼视觉的角度而言无法觉察到很多特征, 但是其丰富的自然场景细节还是能够为 SIFT 特征检测算子所获取, 因此重叠区域宽度阈值较低。上述场景特性对于高分辨率光学遥感卫星任务的规划具有一定的参考意义。

### 3.3 分辨率对重叠区域宽度阈值的影响

上述分析统一选取了地面分辨率 0.46 m 的高分辨率遥感图像。以下对图像进行下采样, 研究不同地面分辨率下重叠区域宽度阈值的变化。

以 GeoEye-1 的一幅城市遥感图像为例, 其重叠区域

所有像素点残差在不同采样倍率下随重叠宽度的变化情况如图10所示。计算得到重叠宽度区域阈值如表5所示。

表5 重叠宽度阈值随采样率的变化关系。

Table 5 Relation between overlap width threshold and sampling rate.

Sampling rate	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Threshold /pixels	22	25	23	22	23	31

由上述数据可知, 随着下采样倍率的减小, 重叠宽度像素阈值并没有太多的变化。此处仅以该幅图为例, 本文共对 12 幅遥感图像进行了下采样分析, 均得到了类似结果。尽管重叠宽度像素阈值基本不发生变化, 实际上由于地面分辨率的增大, 同样像素宽度对应的地面区域在增加。因此在任务规划之中, 地面分辨率将会显著影响地面实际重叠宽度阈值, 随着地面分辨率的增大, 像面重叠宽度像素阈值保持基本不变, 地面实际重叠宽度阈值将会增大。

### 3.4 敏捷特性下重叠区域宽度阈值

同轨多条带拼接成像模型下, 每一条带进行定姿推扫, 卫星指向通常并非星下点。在敏捷特性下, 条带图像相对于在星下点成像时会发生几何变形。根据 2.1 节所描述的几何变形仿真方法, 对 12 幅遥感图像进行了俯仰和横滚的分析。下面以其中一幅机场图像为例进行说明, 如图 11、图 12 所示。

如图 11 所示, 固定特定的等效俯仰角, 重叠宽度像素阈值随等效横滚角变化在  $45^\circ$  以内基本保持平稳, 总体略有上升。当等效俯仰角取  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ , 重叠

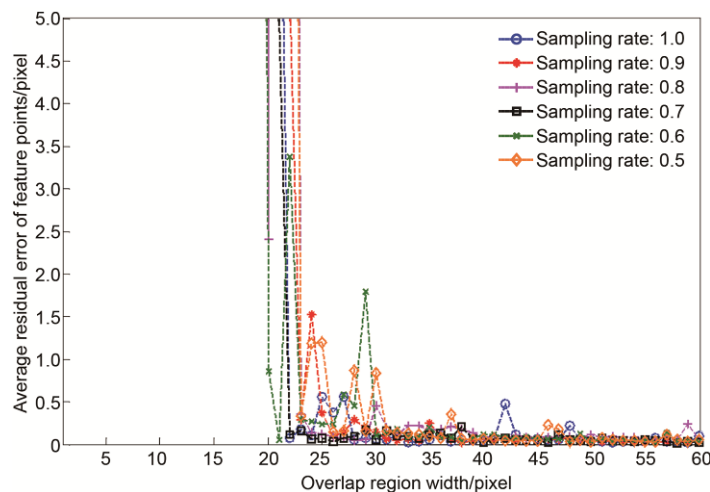


图10 不同下采样率下的重叠区域内所有点的匹配残余 RMSE。  
Fig. 10 RMSE of all points in overlap region at different sampling rates.

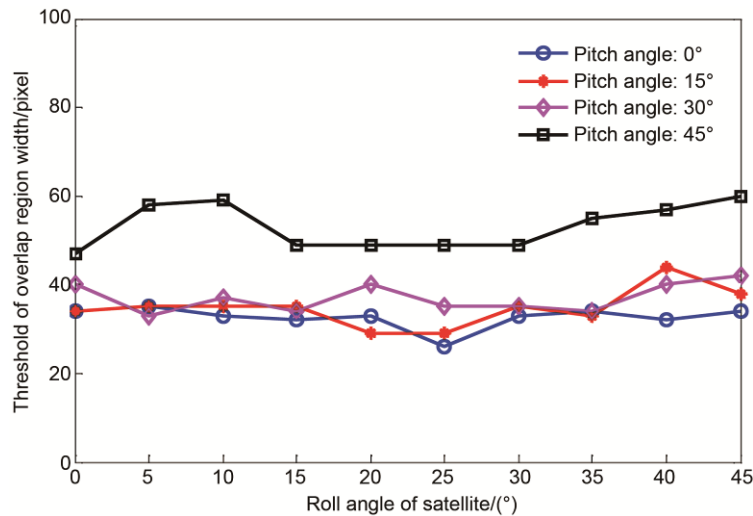


图 11 等效俯仰角为 0°、15°、30°、45°时重叠宽度阈值随等效横滚角的变化关系。  
Fig. 11 Relation between overlap width threshold and roll angle at pitch angle of 0°, 15°, 30° and 45°.

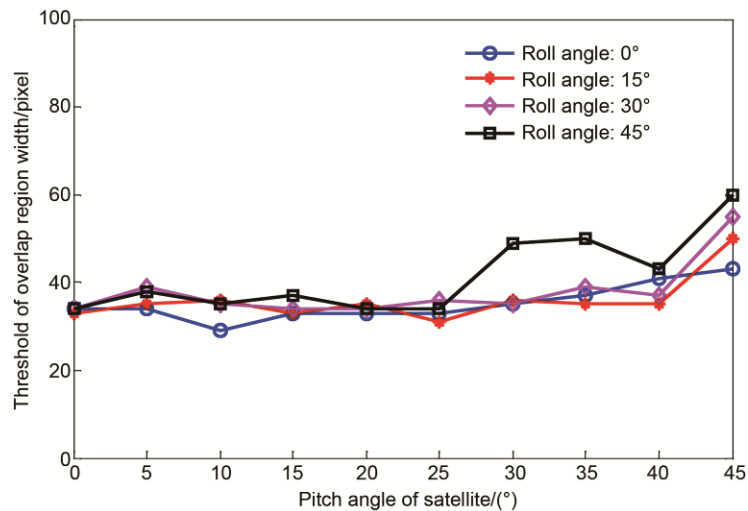


图 12 等效横滚角为 0°、15°、30°、45°时重叠宽度阈值随等效俯仰角的变化关系。  
Fig. 12 Relation between overlap width threshold and pitch angle at roll angle of 0°, 15°, 30° and 45°.

宽度像素阈值基本一致，而当等效俯仰角取 45°，阈值将大幅增加，远远超过等效俯仰角为 30°时的情况。因此可以得出初步判断：等效横滚角在 0°~45°考察范围内，对于阈值的影响不大；等效俯仰角在 30°以内变化时对阈值影响不大，当超过 30°~45°之间某个角度值之后，会对阈值产生较大幅度的影响。

如图 12 所示，固定特定的等效横滚角，重叠宽度像素阈值随等效俯仰角变化总体保持平稳，但均在超过 40°之后大幅增加。此外，当等效横滚角取 45°，等效俯仰角超过 30°时，阈值出现较大的波动。结合图 11 的初步判断，以及其余的 11 幅测试图像的类似规律，给出如下综合结论：

等效横滚角在 0°~45°的范围内，对阈值影响不大，总体而言，随等效横滚角的变大阈值略有增加。等效俯仰角在 0°~40°范围内，对阈值影响不大，总体而言，随等效俯仰角的变大阈值略有增加；但当等效俯仰角超过 40°之后，重叠宽度像素阈值将大幅增加。当等效俯仰角、等效横滚角均超过 30°之后，阈值有时会出现较大幅度的波动，究其原因，由于姿态敏捷程度较大，几何校正带来的图像信息随机变化增加，因此阈值的随机性也会增大。

多条带拼接敏捷成像模式下，由于指向点非星下点，条带出现几何变形，实质也是线阵方向和推扫方向地面分辨率的变化。与 3.3 节相比较，姿态调整对



应的地面分辨率变化,所带来的像面重叠区域像素宽度阈值变化幅度更大,尤其在俯仰方向 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 变化范围内,阈值变化超过10 pixels。此外,再考虑实际对应地面宽度,由于地面分辨率随俯仰/横滚角的增加,地面实际重叠区域宽度阈值相较于星下点时相差更大。敏捷特性对重叠区域宽度阈值提出了更高的要求,在进行各条带的任务规划时,可以此为参考,在相邻条带间设置合理的重叠区域宽度。

## 4 结论

针对多条带拼接敏捷成像模型,同时保证高空间分辨率和高时间分辨率的要求,对条带图像的拼接重叠度进行了研究。提出了重叠区域宽度阈值判断准则,分析了不同场景类型遥感图像的重叠区域宽度阈值,仿真结果表明,在0.46 m地面分辨率时,6类场景类型重叠宽度阈值分布均符合正态分布,阈值在28 pixels以上,其中军港机场、海岛场景类型阈值较大,超过31 pixels。探究了地面分辨率对重叠阈值的影响,仿真结果表明,星下点成像时地面分辨率对像面重叠像素阈值无太大影响,但对地面实际重叠宽度阈值影响较大。研究了多条带拼接敏捷成像的几何退化模型,分析了敏捷特性对于重叠阈值的影响,仿真结果表明,卫星的俯仰和横滚将会增大条带的重叠宽度阈值,几何变形对阈值的影响超过星下点地面分辨率变化。对条带拼接重叠度的仿真分析,为敏捷卫星的高分辨率光学成像任务规划提供了有意义的参考。

## 基金项目

浙江省科技计划项目(2017C01033)资助。

## 参考文献

- Zhang Xinwei, Dai Jun, Liu Fuqiang. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, **20**(4): 32–38.  
张新伟,戴君,刘付强.敏捷遥感卫星工作模式研究[J]. *航天器工程*, 2011, **20**(4): 32–38.
- Han Changyuan. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(3): 201–208.  
韩昌元.近代高分辨地球成像商业卫星[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(3): 201–208.
- Ge Yujun, Zhao Jian, Yang Fang. Review of high resolution optical remote sensing satellite[J]. *Space International*, 2013(5): 2–8.  
葛玉君,赵健,杨芳.高分辨率光学遥感卫星平台技术综述[J]. *国际太空*, 2013(5): 2–8.
- Jacobsen K. High resolution satellite imaging systems-an overview[J]. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2005, **6**: 487–496.
- Poli D, Toutin T. Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors[J]. *The Photogrammetric Record*, 2012, **27**(137): 58–73.
- Lemoine G, Bielski C M, Syrczynski J. Fast surface height determination using multi-angular WorldView-2 ortho ready urban scenes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, **5**(1): 80–88.
- de Lussy F, Kubik P, Greslou D, et al. Pleiades-HR image system products and quality, pleiades-HR image system products and geometric accuracy[C]//*Proceedings International Society for Photogrammetry and Remote Sensing International Conference*, Hannover, 2005: 17–20.
- Cheng Yufeng, Jin Shuying, Wang Mi, et al. An high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 0828003.  
程宇峰,金淑英,王密,等.一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度影像拼接方法[J]. *光学学报*, 2017, **37**(8): 0828003.
- Yu Jing, Xi Jinjun, Yu Longjiang, et al. Study of one-orbit multi-stripes splicing imaging for agile satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, **24**(2): 27–34.  
余婧,喜进军,于龙江,等.敏捷卫星同轨多条带拼接成像模式研究[J]. *航天器工程*, 2015, **24**(2): 27–34.
- Wang Yamin, Xu Wei, Jin Guang, et al. An attitude algorithm based on the band seamless splicing imaging for agile satellite[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, **13**(5): 376–380.
- Sun Tao, Long Hui, Liu Baocheng, et al. Application of side-oblique image-motion blur correction to Kuaizhou-1 agile optical images[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6): 6665–6679.
- Barazzetti L, Roncoroni F, Brumana R, et al. Georeferencing accuracy analysis of a single worldview-3 image collected over milan[M]//Halounova L, Šafář V, Toth C K, et al. XXIII ISPRS Congress, Commission I. 2016: 429–434.
- Ge Yun, Jiang Shunliang, Ye Famao, et al. Remote sensing image retrieval based on the fusion of BoVW and Gabor texture[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(2): 76–81, 88.  
葛芸,江顺亮,叶发茂,等.视觉词袋和Gabor纹理融合的遥感图像检索[J]. *光电工程*, 2016, **43**(2): 76–81, 88.
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91–110.
- Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6): 381–395.